

(19)



JAPANESE PATENT OFFICE

PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11) Publication number: **10069551 A**

(43) Date of publication of application: **10.03.98**

(51) Int. Cl

**G06T 17/40**

**G06T 17/20**

**G06T 15/70**

(21) Application number: **09170921**

(71) Applicant: **NAMCO LTD**

(22) Date of filing: **12.06.97**

(72) Inventor: **YAMAGUCHI KENTARO**

(30) Priority: **14.06.96 JP 08175696**

**(54) THREE-DIMENSIONAL SHAPE DEFORMING  
METHOD, INFORMATION STORAGE MEDIUM  
AND PRODUCTION**

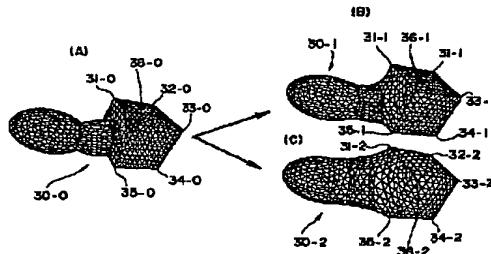
deformed according to this method.

COPYRIGHT: (C)1998,JPO

(57) Abstract:

**PROBLEM TO BE SOLVED:** To facilitate the control of shapes and to generate various shapes, in which a rectangular shape and a smooth shape coexist, by operating surface tension and pressure upon a three-dimensional shape and performing deformation based on their operated results according to a dynamic model.

**SOLUTION:** In a deformation condition setting step, the surface tension and pressure to be operated are set. In this case, restrict conditions are provided based on the shape of the three-dimensional shape before deformation, and a fixed limitation is charged to the shape deformation. By providing such restrict conditions, the three-dimensional shape can be deformed while affecting its original character. In a deformation operating step, the surface tension and pressure applied by parameters are operated upon the three-dimensional shape and on the restrict conditions, it is deformed until a dynamically balanced state is achieved. Concerning objects 30-1 and 30-2, an object 30-0 in the non- changed shape is



(19)日本国特許庁 (J P)

# (12) 公開特許公報 (A)

(11)特許出願公開番号

特開平10-69551

(43)公開日 平成10年(1998)3月10日

(51)Int.Cl.<sup>8</sup>

G 0 6 T 17/40  
17/20  
15/70

識別記号

序内整理番号

F I

G 0 6 F 15/62  
15/60  
15/62

技術表示箇所

3 5 0 K  
6 2 2 C  
3 4 0 K

審査請求 未請求 請求項の数11 FD (全 18 頁)

(21)出願番号

特願平9-170921

(22)出願日

平成9年(1997)6月12日

(31)優先権主張番号

特願平8-175696

(32)優先日

平8(1996)6月14日

(33)優先権主張国

日本 (J P)

(71)出願人

000134855

株式会社ナムコ

東京都大田区多摩川2丁目8番5号

(72)発明者

山口 兼太郎

東京都大田区多摩川2丁目8番5号 株式

会社ナムコ内

(74)代理人

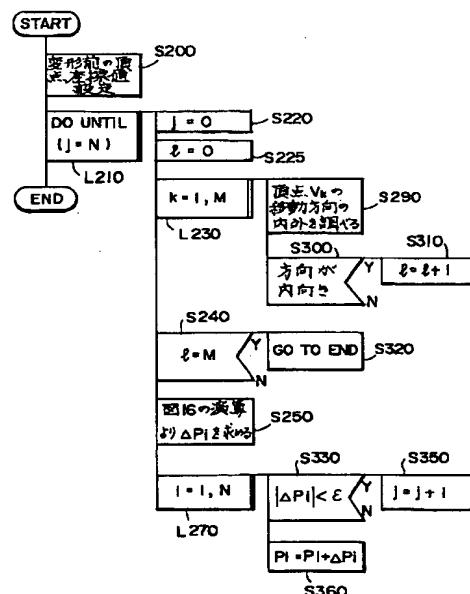
弁理士 布施 行夫 (外2名)

(54)【発明の名称】 3次元形状変形方法、情報記憶媒体及び製造方法

## (57)【要約】

【課題】 形状の制御が容易で、角張った形状と滑らかな形状の共存した様々な形状を生成することができる3次元形状変形方法、その方法実現するためのプログラムを記憶した情報記憶媒体及びその方法により生成した3次元形状の情報を記憶した情報記憶媒体を提供すること。

【解決手段】 3次元形状を変形する方法であって、3次元形状の表面に作用させる表面張力と圧力を変形条件として設定する変形条件設定ステップと、変形前の3次元形状に基づき、前記3次元形状を変形する際の拘束条件を設定する拘束条件設定ステップと、前記変形条件設定ステップにおいて設定された変形条件と、前記拘束条件設定ステップにおいて設定された拘束条件とにに基づき、前記3次元形状の変形を行い、変形後の3次元形状の画像情報を生成する変形演算ステップとを有することを特徴とする。



## 【特許請求の範囲】

【請求項1】 3次元形状を変形する方法であって、3次元形状の表面に作用させる表面張力と圧力を変形条件として設定する変形条件設定ステップと、変形前の3次元形状に基づき、前記3次元形状を変形する際の拘束条件を設定する拘束条件設定ステップと、前記変形条件設定ステップにおいて設定された変形条件と、前記拘束条件設定ステップにおいて設定された拘束条件とに基づき、前記3次元形状の変形を行う変形演算ステップとを有することを特徴とする3次元形状変形方法。

【請求項2】 請求項1において、前記変形条件設定ステップにおいて、前記3次元形状の全体に対して、同一の変形条件を設定することを特徴とする3次元形状変形方法。

【請求項3】 請求項1において、前記変形条件設定ステップにおいて、前記3次元形状の部分毎に、異なった変形条件を設定することを特徴とする3次元形状変形方法。

【請求項4】 請求項1～3のいずれかにおいて、拘束条件設定ステップにおいて、変形前の3次元形状よりも内側又は外側には変形させないよう拘束条件を設定することを特徴とする3次元形状変形方法。

【請求項5】 請求項1～4のいずれかにおいて、変形演算ステップにおいて、変形条件設定ステップで設定した表面張力と圧力を3次元形状に作用させることにより、3次元形状に作用する表面張力と圧力の力のつり合いを演算し、拘束条件の範囲内で、前記表面張力と圧力がつり合うまで変形演算を行うことを特徴とする3次元形状変形方法。

【請求項6】 請求項1～4のいずれかにおいて、変形演算ステップにおいて、変形条件設定ステップで設定した表面張力と圧力を3次元形状に作用させることにより、3次元形状に作用する表面張力のポテンシャルエネルギーと圧力のポテンシャルエネルギーを演算し、拘束条件の範囲内で、前記2つのポテンシャルエネルギーの和が極小になるまで変形演算を行うことを特徴とする3次元形状変形方法。

【請求項7】 3次元形状を変形させるためのプログラムコードを記憶する情報記憶媒体であって、請求項1～6のいずれかの3次元形状変形方法を実施するためのプログラムコードを記憶することを特徴とする情報記憶媒体。

【請求項8】 3次元形状の情報を記憶する情報記憶媒体であって、請求項1～6のいずれかの3次元形状変形方法により変形した3次元形状の情報及び前記3次元形状に基づき生成された画像情報との少なくとも一方を記憶することを特徴とする情報記憶媒体。

【請求項9】 3次元形状を用いて作成した、少なくとも1つの静止映像を記録した映像マスター記録媒体の製造方法であって、該静止映像を請求項1～6のいずれかの3次元形状変形方法により変形させた3次元形状を用いて作成することを特徴とする映像マスター記録媒体の製造方法。

【請求項10】 3次元形状を用いて作成した、複数の徐々に変化する静止映像を記録した動画用映像マスター記録媒体の製造方法であって、該静止映像を請求項1～6のいずれかの3次元形状変形方法により変形させた3次元形状を用いて作成することを特徴とする動画用映像マスター記録媒体の製造方法。

【請求項11】 請求項9又は10の製造方法により製造された映像マスター記録媒体の映像をソース映像として映像をコピーし、該コピー映像を記録媒体に記録してコピー記録媒体を製造することを特徴とする映像記録媒体の製造方法。

## 【発明の詳細な説明】

## 【0001】

20 【発明の属する技術分野】 本発明は、3次元形状を変形させる方法及びその方法を用いた画像合成システムに関し、より具体的には、CG（コンピュータグラフィックス）におけるモデリングの技法として有効な3次元形状を変形させる方法、その方法実現するためのプログラムを記憶した情報記憶媒体及びその方法により生成した3次元形状の情報を記憶した情報記憶媒体に関する。

## 【0002】

【従来の技術】 CG（コンピュータグラフィックス）では、表現したい3次元形状（以下オブジェクトという）30 を得るために、様々なモデリングの技法が開発されている。このようなモデリングの技法には、複数のオブジェクトを合体させたり、変形させたりして、新たなオブジェクトを作成するものがある図1（A）（B）はブーリアンというCGのモデリングの手法を用いて3つのオブジェクト32、34、36を合体させて1つのオブジェクト38を作成する様子を表した図である。ここで、図1（B）のオブジェクト38をすこし膨らませて、図1（C）のような滑らかなオブジェクト38'を作成したい場合、適当なモデリングの技法はなかった。

40 【0003】 最も近いものとしては、複数のオブジェクトを組み合わせて滑らかな形状のオブジェクトを得るメタボールという技法がある。

【0004】 メタボールは、濃度分布によって定義され、3次元空間内の1点を中心として、その周囲に球状に広がる濃度分布を考えるモデリングの技法である。濃度は中心が最大で、中心から遠ざかるに従って減少し、一定距離をすぎると0になるものとする。図2は、この濃度分布をグラフにした濃度カーブ曲線10と、メタボールで得られたオブジェクト16を表している。

50 【0005】 横軸が中心からの距離、縦軸が濃度であ

る。中心点12から濃度が0になる点までの距離を有効半径 $r$ と呼んでいる。この有効半径 $r$ は実際に目に見える半径とは異なる。実際に目に見える半径は濃度が1以上の部分の半径としている。この分歧点となる値1をしきい値と呼び、そのときの半径をしきい値半径 $s$ と呼ぶ。このしきい値半径 $s$ が見かけの半径となり、オブジェクトとして見えるのは半径 $s$ の球16となる。すなわち濃度カーブ曲線10によって定義されたメタボールのオブジェクトは、半径 $s$ の球16である。

【0006】図3は、2つのメタボールの融合する様子を示した図である。図3では濃度カーブ曲線21で定義されたメタボール25と、濃度カーブ曲線22で定義されたメタボール26が接近し、有効半径が重なり合っている。この様に、重なり合った部分23では濃度が単純加算されて、その部分は濃度カーブ曲線24のような濃度分布を描くようになる。従って濃度は増加し、今まで濃度が1以下であった部分が1以上となり(24-a、24-b)、見えなかった部分も見えるようになる(25'、26')。これがメタボールの変形である。

【0007】図4は、前記2つのメタボールを(A)～(H)の順に少しずつ近づけたときの変形後のオブジェクトを表している。図4(A)では、2つのオブジェクト25-1と26-1の有効半径が重なり合っていないか、又は重なり合った部分の濃度がしきい値以下の場合で、この様な場合はオブジェクトは変形しない。

【0008】図4(B)では、2つのオブジェクト25-2と26-2の向かい合った部分では有効半径が重なり合って濃度がしきい値以上の部分ができる、オブジェクトの向かい合った部分が変形している。図4(C)では、前記向かい合った部分さらに変形しており、図4(D)以降は2つのオブジェクトは融合している。そして、図4(E)から図4(G)と融合の度合いが強まり、図4(H)では、2つのオブジェクト25と26の中心が重なった状態の変形後のオブジェクト28を表している。

#### 【0009】

【発明が解決しようとする課題】この様に、メタボールを用いてモデリングを行うと、滑らかな形状を造形できるが、次のような問題点がある。

【0010】第一に、オブジェクトの形状は全て滑らかに丸みを帯びたものとなり、角張った部分を作ることができない。

【0011】第二に、オブジェクト同士は近づくだけで融合を起こすので、オブジェクトを融合させずに近接して配置することは困難である。

【0012】さらに最終形状の予測が困難で、他のプリミティブと組み合わせて使うことが難しいという問題点もある。従ってメタボールでは、図1(C)のオブジェクト38'に示すように1個のオブジェクトの中に角張った形状と滑らかな形状の共存するオブジェクトを作成

することができなかった。

【0013】本発明は、このような課題に鑑みなされたものであり、形状の制御が容易で、角張った形状と滑らかな形状の共存した様々な形状を生成することができる3次元形状変形方法、その方法実現するためのプログラムを記憶した情報記憶媒体及びその方法により生成した3次元形状の情報記憶した情報記憶媒体を提供することにある。

#### 【0014】

10 【課題を解決するための手段】前記目的を達成するため、請求項1は、3次元形状を変形する方法であって、3次元形状の表面に作用させる表面張力と圧力を変形条件として設定する変形条件設定ステップと、変形前の3次元形状に基づき、前記3次元形状を変形する際の拘束条件を設定する拘束条件設定ステップと、前記変形条件設定ステップにおいて設定された変形条件と、前記拘束条件設定ステップにおいて設定された拘束条件とにに基づき、前記3次元形状の変形を行う変形演算ステップとを有することを特徴とする。

20 【0015】本発明の3次元形状変形方法は、3次元形状に表面張力と圧力を作用させて、力学モデルに従いそれらが働く結果に基づき変形を行う手法である。

【0016】変形条件設定ステップでは、作用させるべき表面張力と圧力を設定する。3次元形状に表面張力と圧力を作用させると、その3次元形状が、前記表面張力と圧力に基づき力学的に定まる形状に変形可能なモデルであると仮定して、その変形のためのパラメータである表面張力と圧力を与えることである。本発明で行う3次元形状の変形は、自然界のモデルと違い、パラメータで与えた表面張力と圧力に基づき行われるので、パラメータとしては、必ずしも表面張力と圧力の絶対値を指定する必要はなく、両者の比でもよい。

30 【0017】しかし、力学の法則のままに、何の拘束もないに変形を行えば、球になるかあるいは無限大に膨らむか、限りなく縮んで0に近づいてしまう。そこで、本発明では、変形前の3次元形状の形状に基づいた拘束条件を設け、形状変形に一定の制限を課している。この様な拘束条件を設けることにより、もとの3次元形状の性質に何らかの影響を受けた変形を行うことが出来る。

40 【0018】変形演算ステップでは、パラメータで与えられた表面張力と圧力を3次元形状に作用させて、拘束条件のもとで力学的平衡状態に達するまで変形させる。このときの力学的モデルとして、変形に伴う3次元形状の表面積及び体積の値の変化にかかわらずに、表面張力及び圧力を一定に保つモデルでもよいし、何れか一方、もしくは両方が変化するモデルでもよい。

【0019】この様に3次元形状を、前記力学的モデルに従って変形させる場合、作用させる表面張力と圧力をパラメータによって指定することにより、滑らかにしたり、膨らませたりという形状の変形を、コントロールす

ことができる。従って、経験則に基づいて最終形状の予測が行えるし、また、自然界の力学的モデルに基づいているので、自然界の複雑な形状を再現したいときに有効である。

【0020】請求項2の発明は、請求項1において、前記変形条件設定ステップにおいて、前記3次元形状の全体に対して、同一の変形条件を設定することを特徴とする。

【0021】従って、3次元形状全体を同一の条件で変形させたい場合に有効である。

【0022】請求項3の発明は、請求項1において、前記変形条件設定ステップにおいて、前記3次元形状の部分毎に、異なった変形条件を設定することを特徴とする。

【0023】従って、3次元形状全体の各部分を異なった条件で変形させたい場合に有効である。また、部分的に制御が可能なので、変形の幅が広がり、所望の形状を得るために制御が容易に行える。

【0024】請求項4の発明は、請求項1～3のいずれかにおいて、拘束条件設定ステップにおいて、変形前の3次元形状よりも内側又は外側には変形させないよう拘束条件を設定することを特徴とする。

【0025】本発明の3次元形状変形方法によれば、適当な表面張力と圧力をパラメータとして与えて、拘束条件を設けることにより、もとの3次元形状の特徴又は性質を残した新たな形状を得ることができる。例えばもとの3次元形状の角張った部分を残して膨らませた形状の3次元形状等を得ることができるし、もとの3次元形状の角を丸めた形状の3次元形状等も得ることができる。

【0026】請求項5の発明は、請求項1～4のいずれかにおいて、変形演算ステップにおいて、変形条件設定ステップで設定した表面張力と圧力を3次元形状に作用させることにより、3次元形状に作用する表面張力と圧力の力のつり合いを演算し、拘束条件の範囲内で、前記表面張力と圧力がつり合うまで変形演算を行うことを特徴とする。

【0027】本発明の3次元形状変形方法によれば、作用させた表面張力と圧力による3次元形状の変形の演算を、作用させた表面張力と圧力に基づきオブジェクトの各部分に作用する力が釣り合った状態の3次元形状を変形により求める力学演算で行うことが出来る。従って、自然界の力学モデルに従った演算でオブジェクトの変形演算を行うことの出来る3次元形状変形方法を提供することができる。

【0028】請求項6の発明は、請求項1～4のいずれかにおいて、変形演算ステップにおいて、変形条件設定ステップで設定した表面張力と圧力を3次元形状に作用させることにより、3次元形状に作用する表面張力のポテンシャルエネルギーと圧力のポテンシャルエネルギーを演算し、拘束条件の範囲内で、前記2つのポテンシャル

エネルギーの和が極小になるまで変形演算を行うことを特徴とする。

【0029】本発明の3次元形状変形方法によれば、作用させた表面張力と圧力による3次元形状の変形の演算を、3次元形状に作用する表面張力のポテンシャルエネルギーと圧力のポテンシャルエネルギーの和が極小の状態になったときの3次元形状を求める力学演算で行うことが出来る。従って、自然界の力学的モデルに従った演算でオブジェクトの変形演算を行うことの出来る3次元形状変形方法を提供することができる。

【0030】本システムを使用して画像合成を行うことにより、容易なコントロールで、所望の形状及び複雑な形状を得ることが出来る。また、角張った形状と滑らかな形状の共存した様々な形状を得ることも出来る。

【0031】請求項7の発明の情報記憶媒体は、3次元形状を変形させるためのプログラムコードを記憶する情報記憶媒体であって、請求項1～6のいずれかの3次元形状変形方法を実施するためのプログラムコードを記憶することを特徴とする。

20 【0032】本発明の情報記憶媒体には請求項1～6のいずれかの3次元形状変形方法を実施するためのプログラムコードを含んで記憶されている。このため、当該情報記憶媒体を所与のコンピュータシステムの外部記憶媒体として、或いは当該情報記憶媒体に記憶されているプログラムコードを所与のコンピュータシステムの内部記憶媒体にロードすること等により、所与のコンピュータシステムで容易に請求項1～6のいずれかの3次元形状変形方法を実施することが出来る。

【0033】請求項8の発明の情報記憶媒体は、3次元形状の情報を記憶する情報記憶媒体であって、請求項1～6のいずれかの3次元形状変形方法により変形した3次元形状の情報及び前記3次元形状に基づき生成された画像情報との少なくとも一方を記憶することを特徴とする。

【0034】本発明の情報記憶媒体には請求項1～6のいずれかの3次元形状変形方法により変形した3次元形状の情報及び前記3次元形状に基づき生成された画像情報との少なくとも一方を含んで記憶されている。

【0035】このため、当該情報記憶媒体を所与のコンピュータシステムの外部記憶媒体として、或いは当該記憶媒体に記憶されている前記情報を所与のコンピュータシステムの内部記憶媒体にロードすること等により、所与のコンピュータシステムで容易に請求項1～6のいずれかの3次元形状変形方法により変形した3次元形状の情報又は前記3次元形状に基づき生成された画像情報を用いて画像を生成することが出来る。

【0036】なお、ここにおいて情報記憶媒体とは、RAM、ROM、磁気テープ、CD、フロッピーディスク等を含むものとする。

50 【0037】また、3次元形状の画像情報を生成する方

法であって、請求項1～6のいずれかの3次元形状変形方法により変形した3次元形状に基づいて3次元形状の画像情報を生成するよう構成してもよい。

【0038】さらに、3次元形状の画像情報を生成するシステムであって、請求項1～6のいずれかの3次元形状変形方法により変形した3次元形状に基づいて3次元形状の画像情報を生成する手段と、前記画像情報を生成する手段によって生成された画像情報を所与の情報記憶媒体に記憶させる手段とを含むよう構成してもよい。

【0039】このようにすると、請求項1～6のいずれかの3次元形状変形方法により変形した3次元形状に基づいて3次元形状の画像情報を生成するための方法及びシステムを提供することが出来る。

【0040】また、3次元形状の画像を生成するシステムであって、請求項1～6のいずれかの3次元形状変形方法により変形した3次元形状の情報及び前記3次元形状に基づき生成された画像情報との少なくとも一方を記憶した情報記憶媒体と、前記情報記憶媒体に記憶された3次元形状の情報及び前記3次元形状に基づき生成された画像情報との少なくとも一方を読み出して、3次元形状の画像情報を生成する手段とを有するよう構成してもよい。

【0041】さらに、3次元形状の画像を表示する方法であって、請求項1～6のいずれかの3次元形状変形方法により変形した3次元形状の情報及び前記3次元形状に基づき生成された画像情報との少なくとも一方を記憶した情報記憶媒体を用いて、所与の画像表示装置に画像を表示するよう構成してもよい。

【0042】請求項9の発明の映像マスター記録媒体の製造方法は、3次元形状を用いて作成した、少なくとも1つの静止映像を記録した映像マスター記録媒体の製造方法であって、該静止映像を請求項1～6のいずれかの3次元形状変形方法により変形させた3次元形状を用いて作成することを特徴とする。

【0043】請求項10の発明の動画用映像マスター記録媒体の製造方法は、3次元形状を用いて作成した、複数の徐々に変化する静止映像を記録した動画用映像マスター記録媒体の製造方法であって、該静止映像を請求項1～6のいずれかの3次元形状変形方法により変形させた3次元形状を用いて作成することを特徴とする。

【0044】この様にすると、請求項1～6のいずれかの3次元形状変形方法により変形させた3次元形状を用いて作成した静止映像を記録した映像マスター記録媒体を作成することが出来る。

【0045】請求項11の発明の映像記録媒体の製造方法は、請求項9又は10の製造方法により製造された映像マスター記録媒体の映像をソース映像として映像をコピーし、該コピー映像を記録媒体に記録してコピー記録媒体を製造することを特徴とする。

【0046】ここにおいて映像マスター記録媒体及びそ

のコピー記録媒体とは、動画用映像記録媒体や静止画用映像記録媒体を含んだ概念であり、映画のフィルム、ビデオテープ、ビデオディスク、CD等を含むものとする。

【0047】この様にすると、本発明の手法により作成された3次元形状に基づき作成された映像が記録された映像記録媒体を多数作成することが出来る。

【0048】なお、請求項9又は10の製造方法により映像マスター記録媒体を製造し、該媒体の映像をソース映像として映像をコピーし、該コピー映像を記録媒体に記録してコピー記録媒体を製造するようにしてもよい。

【0049】

【発明の実施の形態】本発明の好適な実施例を、3次元形状データで特定されるオブジェクトの形状を変形させる場合を例にとり説明する。

【0050】図5は、本発明の手法を用いて、オブジェクトの形状を変形させる様子を表した図である。図5

(A)に示すオブジェクト30-0は変更前の形状を表しており、図5 (B)、(C)に示すオブジェクト30-1、30-2は本発明の手法により、表面張力と圧力を作用させてオブジェクト30-0を変形させたものである。図5 (B)のオブジェクト30-1は、図5 (A)のオブジェクト30-0が滑らかな形状に変形しており、図5 (C)のオブジェクト30-2はさらに丸みを帯びた形状に変形している。

【0051】この様に本出願の発明者は、本発明の手法である3次元形状の変形方法をCGのモデリングの手法に適用して、1個のオブジェクトのなかに、角張った形状と滑らかな形状の共存が可能で、形状の制御が容易であるモデリングの手法を開発した。本発明の手法とは、オブジェクトの表面に表面張力と圧力を作用させて、形状を変形させる手法である。

【0052】本発明で用いる表面張力及び圧力の作用の効果は、液体の表面張力及び圧力の作用の効果にヒントを得たものである。液体は全ての表面を出来るだけ小さくしようとする傾向をもつ。表面張力とは、液体の表面積を最少にしようとする方向に働く力であり、定量的には液体の表面において単位長さの線に垂直に働く力である。

【0053】オブジェクトに作用する表面張力及び圧力をシャボン玉に作用する表面張力及び圧力を例にとり説明すると次のようになる。

【0054】図7 (A)は、シャボン玉100に働く表面張力を $\sigma$  ( $\text{kg f/cm}$ )としたとき、シャボン玉100の表面において1辺1cmの正方形Mの各辺 $m_1$ 、 $m_2$ 、 $m_3$ 、 $m_4$ に作用する表面張力 $\sigma$  ( $\text{kg f/cm}$ )のイメージを表した図である。本実施例においてオブジェクトに表面張力を作用させるという場合の表面張力とは、前記 $\sigma$ のことである。また、表面張力によって前記正方形Mに働く力を、前記各辺に働く力の合力 $\alpha$

(kgf) として、前記 $\alpha$  (kgf) がシャボン玉100に作用する様子を表したのが図7 (B) である。同図は、シャボン玉100を前記正方形Mの重心とシャボン玉の中心を含む平面で切ったときのX-X断面図において、表面張力によって前記正方形Mに働く力 $\alpha$  (kgf) を表している。

【0055】図8 (A) は、外気圧を考えない(外気圧を0とする)ときのシャボン玉100に作用する圧力 $p$  (kgf/cm<sup>2</sup>) を表した図である。本実施例でオブジェクトに圧力を作用させるという場合の圧力とは、この $p$ のことである。ここにおいて、シャボン玉100の表面の前記1辺1cmの正方形Mに働く力は $p$  (kgf) となる。

【0056】シャボン玉100が平衡状態に保たれているのは、図8 (B) に示すように、シャボン玉100の各部分において、表面張力 $\sigma$ によって各部分に働く力 $\alpha$ と、圧力 $p$ によって各部分に働く力 $\beta$ とがつり合っているからである。

【0057】本実施例では、オブジェクトに前述した表面張力 $\sigma$ と圧力 $p$ をパラメータとして指定することにより、3次元形状に表面張力 $\sigma$ と圧力 $p$ を作用させて、3次元形状の変形を行う。この変形とは、後述する拘束条件を考えなければ、表面張力 $\sigma$ によって各部分に働く力 $\alpha$ と、圧力 $p$ によって各部分に働く力 $\beta$ とがつり合って平衡状態になったときの形状に変形させることである。

【0058】ところで、オブジェクトに表面張力と圧力を作用させても、何の拘束もなく変形させると、内部の圧力が表面張力に比べて大きすぎるとときは、オブジェクトは膨らんで球又は無限大になってしまい、表面張力が内部の圧力に比べて大きすぎるとときは、オブジェクトは縮んで0になってしまふ。これでは、どの様なオブジェクトを変形させても無限大、球又は0になってしまふので、モデリングとしてはほとんど意味をなさない。

【0059】しかし例えば、図5 (A) に示すオブジェクト30-0に表面張力と圧力を作用させて、図5 (B) に示す滑らかな形状のオブジェクト30-1や、図5 (C) に示すさらに膨らんだ形状のオブジェクト30-2を得ることが出来れば、有効なモデリングを行うことができる。

【0060】一方、アーティストがオブジェクトを変形させる際、元のオブジェクトの形状になんらかの関連をもって変形させると、変形の制御及び形状の予測が可能となり有効なモデリング技法となる。

【0061】そこで、本発明の手法では、変形前のオブジェクトの形状に基づき、前記オブジェクトを変形する際の拘束条件を設定している。

【0062】例えば図5 (B) の変形では、もとの形状より内側には変形させないよう拘束条件を設定している。この様に拘束条件を設定することにより、球又は0になってしまふことなく、図5 (A) に示すもとのオブ

ジェクト30-0のくびれ部分が滑らかになった図5 (B) に示すオブジェクト30-1や、図5 (C) に示すさらに膨らんだ形状のオブジェクト30-2を得ることができる。さらに注目すべきは、図5 (A) に示すもとのオブジェクトの角部である31-0、32-0、33-0…が、図5 (B) に示す変形後のオブジェクトの角部31-1、32-1、33-1…や、図5 (C) に示す変形後のオブジェクトの角部31-2、32-2、33-2…にも残っていることである。

【0063】図9 (A) ~ (E) は、もとのオブジェクトの形状より内側には変形させないよう拘束条件を設定し、作用させる圧力 $p$ の値を変えて(表面張力 $\sigma$ を一定とする)オブジェクトを変形させた場合の、変形前後のオブジェクトの形状を表したものである。

【0064】40は、変形前のオブジェクトの形状であり、 $g$ は圧力 $p$ 及び表面張力 $\sigma$ により各部分に働く力の合力を表している。表面張力 $\sigma$ を一定にして、圧力 $p$ の値を変えると、圧力 $p$ が高くなるにつれて、変形後のオブジェクトの形状は、41、42、43、44、45のようになる。42は圧力 $p$ を0とした場合であり、41は圧力 $p$ が負の場合(オブジェクトを外から内に向かっておず压力)、43以降は正方向(オブジェクトを内から外に向かっておず方向)へ、圧力が大きくなる場合である。

【0065】図9 (A) のように、負の圧力 $p$ を作成させると、40-1に示すように圧力 $p$ 及び表面張力 $\sigma$ の合力として、内向きの力が働くが、拘束条件によって内側には変形しないので、変形後の41はもとの形状のままである。

【0066】図9 (B) のように、圧力 $p$ として0を作成させると、40-2に示すような圧力 $p$ 及び表面張力 $\sigma$ の合力 $g$ が働くが、拘束条件によって内側には変形しないので、外向きの力の方向にのみ変形し、42のようになる。

【0067】図9 (C) (D) は、(B) よりやや圧力 $p$ が高い場合で、オブジェクトにおいて外側に引っ張る力 $g$ が存在している状態の変形を表しており、図9 (E) は、(C) (D) よりさらに圧力が高く、オブジェクトの全てにおいて、外側に引っ張る力 $g$ が働いている状態の変形を表しており、平衡状態に達することなく、無限大に膨らんでしまう。

【0068】この様に本発明の手法による変形では、適切な表面張力 $\sigma$ 、圧力 $p$ 及び拘束条件を設定することにより、有効な変形を行うことが出来、1個のオブジェクトの中に、角張った形状と滑らかな形状の共存も可能である。

【0069】また、このような拘束条件を設けることによって、オブジェクトの凸部分はもとの形状を残し、凹部分は滑らかな形状に変形させることも出来る。

【0070】例えば、オブジェクト60のもとの形状よ

り内側には変形させないように拘束条件をつけ、図10 (A) のような断面をもつオブジェクト60の表面に表面張力 $\sigma$  (各点における表面張力の合力を $\alpha$ とする)、圧力 $p$ を作用させると、図10 (B) のように変形させることができる。

【0071】すなわち、オブジェクトは内側には変形できないので、表面張力と圧力の合力 $g$ が外側に向かっている部分のみ変形する。従って、凸部分62 (A, H, G, F, E, D) に働く合力 $g$ が外側には働くかない範囲で、表面張力 $\sigma$ と圧力 $p$ を作用させると、凹部分64のB, Cのコーナ付近は表面張力 $\sigma$ と圧力 $p$ の合力 $g$ が外側に作用する。従って、図10 (B) のように凸部分62はもとの形状を残し、凹部分64は滑らかな形状に変形するのである。

【0072】また、拘束条件をオブジェクトの内側にのみ変形可能とすることで、図6のようにオブジェクトの角を丸める変形を行うこともできる。

【0073】すなわち、オブジェクトは内側にのみ変形可能なので、表面張力 $\sigma$ と圧力 $p$ の合力 $g$ が内側に向かっている部分のみ変形する。従って、図6 (A) に示すオブジェクトである立方体の頂点と稜線では合力が内側になるように、かつオブジェクトが収縮しすぎないような表面張力 $\sigma$ と圧力 $p$ を作用させると、図6 (B) に示すような立方体の角を丸める変形を行うこともできる。

【0074】なお閉じたオブジェクトがある場合、通常、現実世界のものであれば、見えない部分を内側という。従って、内側には変形させないとは、文字どおり現実の世界の内外の内側には変形させないということを意味している。

【0075】しかし例えばポリゴンで構成されたオブジェクトの場合、ポリゴンに内外を指定できるが、この場合の内外は、現実の内外とは無関係に指定できる。従って現実には外側である、閉じたオブジェクトの目に見える部分を内側と指定することもできる。この様な場合、

【内側】とは、現実の世界の内側とは逆になっている。

【0076】例えば、前述した図6 (A) ような立方体のオブジェクトがポリゴンで構成されている場合、立方体の外側に向いた面をポリゴンの内側と指定することにより、オブジェクトの外側にのみ変形可能とする拘束条件で、前記変形と同じ図6 (B) の結果を得ることが出来る。

【0077】この様に、元の形状の内側には変形させないよう拘束条件を設定したり、その逆に内側にのみ変形可能に拘束条件を設定したりすることにより、変形前のオブジェクトの形状に何らかの形で拘束されたオブジェクトを得ることが出来る。

【0078】この様に本発明の手法では、オブジェクトに表面張力 $\sigma$ と圧力 $p$ を作用させ、適当な拘束条件に従って変形させることで様々な形状を得ることが出来る。

以上、本発明の手法の概念について説明したが、以下本

発明の手法の具体的な使用態様及び本発明の手法を実現するための演算手法について説明する。

【0079】図11はCGで、本発明の手法を用いてモデリングを行うときの手順を示したフローチャート図である。

【0080】まず、アーティストは、変形の対象となるオブジェクトを用意し (ステップ10) 、オブジェクトに作用させる表面張力 $\sigma$ と圧力 $p$ とをパラメータとして指定する (ステップ20) 。

【0081】なお、ここにおいて変形を行うオブジェクトは、複数のオブジェクトを結合して1つのオブジェクトとしたものでもよい。例えば前述したように、別々に作成した複数のオブジェクトをブーリアン等で結合させ、本発明の手法で変形をおこなうと有効な効果をあげることが出来る。また、このパラメータは、オブジェクト全体に対して一様な値を指定することもできるし、各部分毎に異なった値を指定することもできる。

【0082】また、圧力 $p$ ／表面張力 $\sigma$ の値が同じであれば (表面張力 $\neq 0$ ) 、結果は等しいので、比の値でもよいし、何れか一方の値を固定して他方の値を指定するようにしてもよい。

【0083】そして、オブジェクトの変形を拘束する拘束条件を指定する (ステップ30) 。なお、拘束条件は予め一意的に定まっている場合は、アーティストは指定しなくてもよい。

【0084】その後、指定されたパラメータ及び拘束条件に基づいて、対象となるオブジェクトについて変形演算を行う (ステップ40) 。アーティストは、演算終了後のオブジェクトを視覚的に確認し (ステップ50) 、

30 OKであればそのオブジェクトのデータを得る。

【0085】また所望の形状ではないときは、新たなパラメータ又は拘束条件を設定し直して、再び本発明の手法による変形を行う。アーティストはこの様に試行錯誤により、所望の形状のデータを得る。

【0086】次に本発明の手法を実現するための具体的な演算手法及びアルゴリズムについて説明する。具体的な実現手法は対象となるオブジェクトがどの様に定義或いは構成されているかによって異なるので、本実施例では、ポリゴンにより構成されているオブジェクトを対象とした本発明の手法について説明する。

【0087】なお、オブジェクトの変形にあたっては、前述したように変形に伴う3次元形状の表面積及び体積の変化にかかわらずに、常に表面張力 $\sigma$ と圧力 $p$ を一定に保つモデルを用いるものとする。

【0088】なお、アーティストは変形を定義するパラメータとして、表面張力 $\sigma$ に対する圧力 $p$ の比を指定するものとする。

【0089】さらに、作用させる表面張力 $\sigma$ と圧力 $p$ の平衡状態を求める演算方法も、力の釣り合いを演算する方法もあれば、表面張力 $\sigma$ と圧力 $p$ によりオブジェクト

がポテンシャルエネルギーを持っていると考えて、エネルギー極小化問題として演算する方法もある。まず、前者の場合の演算方法及びアルゴリズムについて説明する。

【0090】1. 第一の変形演算の実施の形態

本実施例で扱うオブジェクトは、ポリゴンにより構成されているので、ポリゴンの頂点座標を移動させることによって、実質的な変形を行っている。すなわち各頂点に作用する表面張力 $\sigma$ と圧力 $p$ の合力を求め、各頂点をその合力方向に移動させるのである。そして移動した結果、全ての頂点における合力ベクトルが0（若しくは十分に小さな値）又は、拘束条件により拘束されて動かなくなるまで、前記処理を繰り返すループ処理を行う。

【0091】まず頂点に作用するベクトルは、次の方法で求める。

【0092】表面張力

図13 (A) に示すように、頂点の周囲の1つのポリゴンについて、エッジ上（ポリゴンの稜線）に単位ベクトル $U_0, U_1$ を作り、 $U_0, U_1$ のなす角を $\theta$ とする。なお、本実施の形態では、表面張力 $\sigma$ を1に固定している。

【0093】図13 (B) に示すように、弧に垂直な力の合力は、弦に垂直な力の合力に等しいことを利用して、頂点を中心とし、このポリゴン上に半径1の扇型を作り、弧の部分に作用する力を求める。頂点の周囲にn個のポリゴンが存在する場合、 $i$ 番目のポリゴンの弧の部分に作用する力ベクトルを $F_i$ とすると、次式のようになる

【数1】

$$F_i = |U_0 - U_1| \frac{U_0 + U_1}{|U_0 + U_1|}$$

そして、数1で表される力のベクトルを頂点の周囲のn個のポリゴンについて求め合計し、合力ベクトル $F_t$ を求めるが、このとき以下のように行う。

【0094】すなわち、 $i$ 番目のポリゴンの $\theta$ を $\theta_i$  ( $i = 0 \sim n-1$ ) として、頂点の周囲の角を合計する数2で表される。

【0095】

【数2】

$$\sum_{i=0}^{n-1} \theta_i$$

数2が小さい場合、頂点に作用する力が必要以上に小さくなってしまうので、これを補正するために、合力ベクトル $F_t$ を求める際に次式で表される数3を掛ける。

【0096】

【数3】

$$\left( \frac{2\pi}{\sum_{i=0}^{n-1} \theta_i} \right)^2$$

さらにオブジェクトサイズに比例した大きさにするために、合力ベクトル $F_t$ を求める際に次式で表される数4を掛ける。

【0097】

10 【数4】

$$\sqrt{\sum_{i=0}^{n-1} A_i}$$

但し $i$ 番目のポリゴンの面積を $A_i$ とする。

【0098】この様にして、表面張力により頂点に働く力の合力ベクトル $F_t$ は次式数5で表される。

【0099】

【数5】

20

$$F_t = \left( \sum_{i=0}^{n-1} F_i \right) \left( \frac{2\pi}{\sum_{i=0}^{n-1} \theta_i} \right)^2 \sqrt{\sum_{i=0}^{n-1} A_i}$$

圧力

オブジェクトの内側に作用する圧力を $p$ とする。この $p$ の値は、アーティストがパラメータとして指定した値である。また頂点の周囲にあるn個のポリゴンのうち $i$ 番目のポリゴンの面積を $A_i$ 、法線ベクトルを $N_i$ 、頂点数を $a_i$ とする。 $(|N_i| = 1)$

30  $i$ 番目のポリゴンに作用する力ベクトルは、数6で表される。

【0100】

【数6】

$$PA_i \cdot \vec{N}_i$$

そして、この力ベクトルがポリゴンに属する頂点に均等に分散されると考える。頂点に作用する合力ベクトル $F_p$ は、周囲のポリゴンについて求めた上記ベクトルの合力ベクトルとなる。従って圧力により頂点に働く力ベクトル $F_p$ は数7で表される。

【0101】

【数7】

$$\begin{aligned} F_p &= \sum_{i=0}^{n-1} (PA_i \cdot \vec{N}_i / a_i) \\ &= p \sum_{i=0}^{n-1} (A_i \cdot \vec{N}_i / a_i) \end{aligned}$$

50 本実例では、オブジェクトに作用する力を表面張力 $\sigma$ と圧力 $p$ のみによって決定するので、頂点に作用する力ベ

クトル  $\vec{F}$  は、表面張力による力ベクトル  $\vec{F}_t$  と圧力による力ベクトル  $\vec{F}_p$  の合力である数 8 で表される。

【0102】

【数8】

$$\vec{F} = \vec{F}_t + \vec{F}_p$$

各頂点では、それぞれの合力ベクトル  $\vec{F}$  の方向に移動しようという力が働いている。この力が0のときは、その頂点は平衡状態に達しており、また、今回は内側には変形させないという拘束条件が設定されているので、前記力が内向きのときは頂点移動は行われない。

【0103】従って、前記力がオブジェクトの外側を向いている場合のみ、頂点を前記合力ベクトルの方向に移動させる。

【0104】移動量は次の方法で求める。図14は頂点移動の処理に用いる一次外挿の原理を表した図であり、横軸は頂点の移動量、縦軸は合力ベクトルの大きさを表している。頂点を合力ベクトル  $\vec{F}$  方向に微少量  $\delta$  だけ移動させ、移動後の合力ベクトル  $\vec{F}'$  を求める。そして、図14に示すように合力ベクトルと頂点移動の関係がリニアに変化すると近似すると、その合力ベクトルと頂点移動の関係は直線200で表され、その傾きは数9で表される。

【0105】

【数9】

$$\frac{|\vec{F}| - |\vec{F}'|}{\delta}$$

そして、前記関係200に基づき、頂点移動後の合力ベクトルが0となる移動量  $\gamma$  を求める。

【0106】実際には、合力ベクトルと頂点移動の関係がリニアに変化するとは限らないので、 $\gamma$  だけ移動させて合力ベクトル  $\vec{F}'$  を求めても0にはならない。そこで、このような処理をループにし、繰り返すことで合力ベクトルを0に収束させる。

【0107】このようなループ処理を用いて変形後の頂点座標をもとめるアルゴリズムを以下説明する。

【0108】図12は、もとのオブジェクトの内側には変形させないという拘束条件を設定したときの、本発明の手法の変形演算のアルゴリズムを表したPAD図である。本発明の手法の変形演算では、全ての頂点について本アルゴリズムに従って頂点の移動のループ処理を行い、全ての頂点の移動が終了した時点で変形が終了する。

【0109】図12において、Nは頂点数であり、kはオブジェクトの全ての頂点の処理が終わったかどうか判断するための頂点のカウンタであり、1は収束状態に達したかどうかを判断するための頂点移動が行われなかつた頂点のカウンタである。

【0110】本処理は、変形前のオブジェクトの各頂点

の頂点座標の設定を行う処理（ステップ100）と、収束状態に達するまで変形を行う処理（ループ110）からなる。

【0111】前記収束状態に達するまで変形を行う処理（ループ110）では、1=Nになるまで以下の処理を行う。まず、変数k、1の初期化する処理（ステップ120）を行い、頂点における合力ベクトルの演算に必要な各ポリゴンの面積演算（ステップ130）を行う。ステップ120とステップ130の処理は初回又は頂点移動が一巡して新たな頂点座標が設定されたときに行う。

【0112】そして、オブジェクトを構成する頂点の頂点移動を一巡させるループ処理（ループ140）を行う。該ループ処理では、頂点移動が一巡するまで（k=1～N）以下の処理を行う。

【0113】まず、各頂点  $V_k$  における合力ベクトルを演算する（ステップ160）。この演算では前述したように、表面張力と圧力の合力ベクトルを求めるこにより行う。すなわち表面張力の合力ベクトルとして数5、圧力の合力ベクトルとして数7、これら両者の合力ベクトルとして数8を求めるのである。

【0114】合力ベクトルが0である時は、その頂点においては力がつり合っているので、頂点は移動しない。また、本実施の形態では、内側には変形しないという拘束条件が設けられているので、合力ベクトルが内向きの場合も頂点は移動しない。

【0115】従って、合力ベクトルが0又は内向きであるかどうか判断して（ステップ170）、yesである場合は、頂点移動が行われなかつた頂点のカウンタである1をカウントアップする（ステップ180）。noのときは対象となる頂点  $V_k$  の移動演算を行い、頂点座標を再設定する（ステップ190）。この頂点移動演算において、頂点の移動方向は合力ベクトルの方向とし、移動量  $\gamma$  は前述した一次外挿の演算処理により求める。

【0116】2. 第二の変形演算の実施の形態  
次に、表面張力  $\sigma$  と圧力  $p$  によるポテンシャルエネルギーを考えて、エネルギー極小化問題として演算する方法について説明する。

【0117】変形を高速に収束させるためには、局所的なバランスではなくオブジェクト全体の状態を捉えてコントロールするのが有効である。そこで、表面張力  $\sigma$  と圧力  $p$  によるポテンシャルエネルギーを考える。表面張力  $\sigma$  と圧力  $p$  がつり合った安定な状態とはこのポテンシャルエネルギーの極小状態に相当する。そこで、オブジェクトの変形を、表面張力  $\sigma$  と圧力  $p$  の力の釣り合い状態として求める代わりに、上記エネルギーEの極小状態の形状として求めることが出来る。

【0118】以下その具体的な演算方法について説明する。まず表面張力  $\sigma$ 、圧力  $p$  によりオブジェクトがもつポテンシャルエネルギーを定義する。

【0119】表面張力によるポテンシャルエネルギーの

## 定義

表面張力 $\sigma$ とは面積を小さくしようとする力であるから、ポテンシャルエネルギーとしては、面積の増加に伴い単調増加するものになる。これを表面エネルギーと呼び $E_s$ で表すことにする。

【0120】圧力によるポテンシャルエネルギーの定義また、オブジェクトの内部に圧力 $p$ が作用している状態は図8(A)のようにモデル化できる。従ってオブジェクトの体積を $V_0$ とすると、圧力 $p$ によるポテンシャルエネルギー $E_v$ は次式であらわされる。

$$[0121] E_v = -p V_0$$

このエネルギーを体積エネルギーと呼ぶことにする。

【0122】この様にするとオブジェクトの持つ総ポテンシャルエネルギー $E$ は、

$$E = E_s + E_v$$

で表される。

【0123】次に $E_s$ 、 $E_v$ の詳細について述べる。

【0124】表面エネルギーモデル

表面エネルギー $E_s$ を以下のように定める。本実施例で扱うオブジェクトは、ポリゴンにより構成されており、以下ポリゴンの形状が3角形である場合について説明する。

【0125】表面エネルギー $E_s$ は、オブジェクトを構成する各ポリゴンの表面エネルギー $S$ の総和とする。

【0126】

【数10】

$$E_s = \sum S$$

図15に示すように、ポリゴンの面積を $A$ 、エッジ長 $l_0$ 、 $l_1$ 、 $l_2$ の2乗和を $L$ とする。

【0127】

【数11】

$$L = l_0^2 + l_1^2 + l_2^2$$

また、 $S$ には次の性質を持たせることにする。

【0128】a.  $S$ は面積 $A$ に比例する。

【0129】b.  $S$ はポリゴンの形が正3角形に近いほど小さい。

【0130】ポリゴンの形状がどの程度正3角形に近いかを表すパラメータとして、以下に示す数12を用いる。

【0131】

【数12】

$$\frac{L}{A}$$

また前記a、bの性質を満たす式として数13を用いることにする。

【0132】

【数13】

$$S = A \cdot \frac{L}{A} = L$$

ポリゴンの3頂点の座標を、 $(x_0, y_0, z_0)$ 、 $(x_1, y_1, z_1)$ 、 $(x_2, y_2, z_2)$ とし、これを用いて、数13の $S$ をあらわすと次式のようになる。

【0133】

【数14】

$$[0134] S = (x_0 - x_1)^2 + (y_0 - y_1)^2 + (z_0 - z_1)^2 + (x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2 + (x_2 - x_0)^2 + (y_2 - y_0)^2 + (z_2 - z_0)^2$$

## 体積エネルギーモデル

オブジェクトの体積エネルギー $E_v$ は前述のように

$$E_v = -p V_0$$

と表される。座標原点 $(0, 0, 0)$ と1つのポリゴン(3角形)で構成される4面体の体積を $V$ とすると、オブジェクト全体の体積は、

【数15】

$$V_0 = \sum V$$

となる。但し、原点がポリゴンに対して表側にあるときは、 $V$ は負の値をとるものとする。ポリゴンの頂点座標を $P_0 (x_0, y_0, z_0)$ 、 $P_1 (x_1, y_1, z_1)$ 、 $P_2 (x_2, y_2, z_2)$ とすると、原点を始点とし、 $P_0$ 、 $P_1$ 、 $P_2$ を終点とするベクトルはそれぞれ $\vec{P}_0$ 、 $\vec{P}_1$ 、 $\vec{P}_2$ となり、 $V$ は次式で表される。

【0134】

【数16】

$$V = \frac{1}{6} (\vec{P}_2 \times \vec{P}_1) \cdot \vec{P}_0$$

## エネルギー式の解き方

頂点の個数を $M$ とすると、各頂点は、 $x$ 、 $y$ 、 $z$ の座標値を変数として持つので、オブジェクトの全エネルギー $E$ は、 $3M$ 個の変数についての関数として表される。

【0135】 $N = 3M$

とし、各頂点 $V_j$  ( $j = 0 \sim M-1$ ) の $x$ 、 $y$ 、 $z$ 座標 $V_{xj}$ 、 $V_{yj}$ 、 $V_{zj}$ に対し、

$$P_0 = V_{x0}, P_1 = V_{y0}, P_2 = V_{z0}, \dots$$

$$P_{3j} = V_{xj}, P_{3j+1} = V_{yj}, P_{3j+2} = V_{zj}, \dots$$

$$P_{N-3} = V_{x(M-1)}, P_{N-2} = V_{y(M-1)}, P_{N-1} = V_{z(M-1)}$$

…、

とすると $N$ 個の変数を $p_i$  ( $i = 0 \sim N-1$ ) と表すことが出来、エネルギー $E$ は次の形に表現出来る。

【0136】 $E = f (p_0, p_1, \dots, p_{N-1})$

$E$ の値が極小となる $p_i$  ( $i = 0 \sim N-1$ ) を求めるには、

【数17】

$$\frac{\partial E}{\partial p_i} = 0$$

19

を解けばよいことになる。数17の意味するものは、次の連立方程式である。

【0137】

【数18】

$$\frac{\partial E}{\partial P_0} = 0$$

↓

$$\frac{\partial E}{\partial P_{N-1}} = 0$$

各方程式は、前述のエネルギーモデルにより、非線形方程式になる。従って問題は数18の連立方程式を解くことに帰着される。

【0138】連立方程式の解法

前記連立方程式(数18)をニュートン法を用いて解くこととする。このとき以下の手法で計算を行う。

【0139】手順1.  $p_i$  ( $i = 0 \sim N-1$ ) に初期値\*

10

\*を与える。初期値としては入力オブジェクトの頂点座標を用いる。

【0140】手順2.  $E$  の1階、2階の偏微分係数  $E_i$ 、 $E_{ij}$  を求める。

【0141】

【数19】

$$E_i = \frac{\partial E}{\partial P_i}$$

【数20】

$$E_{ij} = \frac{\partial^2 E}{\partial P_j \partial P_i}$$

手順3. 次式を解き、 $\Delta p_i$  ( $i = 0 \sim N-1$ ) の値を求める。

【0142】

【数21】

$$\begin{pmatrix} E_{0,0} & \cdots & E_{0,i} & \cdots & E_{0,N-1} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ E_{j,0} & \cdots & E_{j,i} & \cdots & E_{j,N-1} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ E_{N-1,0} & \cdots & E_{N-1,i} & \cdots & E_{N-1,N-1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta P_0 \\ \vdots \\ \Delta P_i \\ \vdots \\ \Delta P_{N-1} \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} E_0 \\ \vdots \\ E_j \\ \vdots \\ E_{N-1} \end{pmatrix}$$

手順4. 数21の  $p_i$  を  $p_i + \Delta p_i$  で置き換える。

【0143】手順5.  $|\Delta p_i|$  の値が十分小さくなるまで、手順2～手順4を繰り返す。

【0144】なお、手順2において  $E$  の1階、2階の偏微分は、 $E = E_s + E_v$  より

【数22】

$$\frac{\partial E}{\partial P_i} = \frac{\partial E_s}{\partial P_i} + \frac{\partial E_v}{\partial P_i}$$

【数23】

$$\frac{\partial^2 E}{\partial P_i \partial P_j} = \frac{\partial^2 E_s}{\partial P_i \partial P_j} + \frac{\partial^2 E_v}{\partial P_i \partial P_j}$$

なお、 $E_s$ 、 $E_v$  は前述の定義によるものを使用する。

【0145】拘束条件

前述の連立方程式の解法は拘束条件を考慮していない場合を示したが、本発明の手法では、頂点を移動させ、オブジェクトを変形させる際に、拘束条件を設定することにより、有効な変形を行うことが出来る。そこで、以下もとの形状より内側には変形させないという拘束条件を設定した場合を例にとり説明する。

【0146】前記拘束条件のもとでオブジェクトを変形させるためには、オブジェクトの内側へ移動しようとする頂点を検出し、その頂点が固定されるように数21を

修正する必要がある。

【0147】手順1. まず、固定すべき頂点の検出を行う。数21の右辺の値である

【数24】

$$- \frac{\partial E}{\partial P_i}$$

は、ポテンシャルエネルギーの下り方向の勾配ベクトルを意味する。そこで、頂点の座標値を  $(P_i, P_j, P_k)$  とすると、下記のベクトル

【数25】

$$\left( -\frac{\partial E}{\partial P_i}, -\frac{\partial E}{\partial P_j}, -\frac{\partial E}{\partial P_k} \right)$$

の方向が、オブジェクトの内外いずれを向いているかを調べ、頂点の固定、非固定を決める。ここでは、もとの形状より内側には変形させないという拘束条件を設けているので、数25で示されるベクトルの方向が内側を向いている場合には、その頂点を固定する。なお、オブジェクトを構成する各ポリゴンには表裏の設定がなされているので、前記ベクトルが頂点の周囲の各ポリゴンの表の方向を向いていれば外向き、裏の方向を向いていれば内向きと判定する。

【0148】手順2. 前記判定をオブジェクトを構成する全ての頂点について行い、固定すべき頂点が決定されたら、その頂点を固定するために数21に修正を加え

40

調べ、頂点の固定、非固定を決める。ここでは、もとの形状より内側には変形させないという拘束条件を設けているので、数25で示されるベクトルの方向が内側を向いている場合には、その頂点を固定する。なお、オブジェクトを構成する各ポリゴンには表裏の設定がなされているので、前記ベクトルが頂点の周囲の各ポリゴンの表の方向を向いていれば外向き、裏の方向を向いていれば内向きと判定する。

50

【0149】手順3. 前記判定をオブジェクトを構成する全ての頂点について行い、固定すべき頂点が決定されたら、その頂点を固定するために数21に修正を加え

る。ここでは、頂点 ( $p_x, p_y, p_z$ ) を固定する場合を例に取り数21の修正方法を説明する。

【0149】この修正については、例えば次のように行う。数21を構成する連立方程式のうち、3つ式を【数26】

$$\Delta p_x = 0, \Delta p_y = 0, \Delta p_z = 0$$

に置き換え、残り $N-3$ 個の式から $\Delta p_x, \Delta p_y, \Delta p_z$ の項を除去する。

【0150】すなわち数21の右辺については下記の修正を行う。

$$E_x = E_y = E_z = 0$$

また左辺のマトリクスについては下記の修正を行う。

$$E_{xx} = E_{yy} = E_{zz} = 1$$

$$E_{yz} = E_{zx} = E_{xy} = E_{zy} = E_{xz} = E_{yx} = 0$$

$$E_{xi} = E_{yi} = E_{zi} = E_{ix} = E_{iy} = E_{iz} = 0$$

$$(i = 0 \sim N-1, i \neq x, y, z)$$

図16はこの式を図示したものである。

【0153】なお、オブジェクトの最終形状における拘束条件を、初期の段階で決定することは困難であるので、ニュートン法の1ステップ毎に上記の手順1、手順2の方法で拘束条件の再設定を行う。

【0154】このようなニュートン法を用いて変形後の頂点座標を求めるアルゴリズムを以下説明する。

【0155】図17は、もとのオブジェクトの内側には変形させないという拘束条件を設定したときの、本発明の手法の変形演算のアルゴリズムを表したPAD図である。本発明の手法の変形演算では、全ての頂点 $V_k$  ( $k = 1 \sim M$ ) が拘束条件により固定されて移動出来なくなるか、前記頂点を構成する全x、y、z座標に対応する $p_i$  ( $i = 1 \sim N, N = 3M$ ) について $|\Delta p_i|$ の値が十分小さくなるまで、本アルゴリズムに従って頂点の移動のループ処理を行い、全ての頂点の移動が終了した時点で変形が終了する。

【0156】図17において、Mは頂点数であり、Nは頂点の座標を表す変数x、y、zの総数である。また、kはオブジェクトの全ての頂点に対し移動方向をチェックするための頂点のカウンタであり、1は拘束条件に拘束されて移動できなかった頂点のカウンタである。また、iは全頂点のx、y、z座標に対応する $p_i$  ( $i = 0 \sim N-1, N = 3M$ ) に用いる添え字であり、jは $p_i$ の移動量 $|\Delta p_i|$ が十分小さいような $p_i$ の個数をカウントするカウンタである。

【0157】この処理は、変形前のオブジェクトの各頂点の頂点座標の設定を行う処理(ステップ200)と、全ての $|\Delta p_i|$ の値が十分小さくなるまで( $j = N$ になるまで)行うループ処理(ループ210)で構成されている。

【0158】前記ループ処理(ループ210)は、変数j、1の初期化を行う処理(ステップ220、225)

と、オブジェクトを構成する全頂点から固定される頂点を検出する処理(ループ230)と、全頂点が固定されているかどうか判定する処理(ステップ240)と、拘束条件を設定してニュートン法により各頂点の移動量を求める処理(ステップ250)と、前記演算の結果、各 $p_i$ について収束しているかどうか判断し、各頂点の移動を行う処理(ループ270)で構成されている。

【0159】前記オブジェクトを構成する全頂点から、固定される頂点を検出する処理(ループ230)では、全頂点に対し以下の処理を行う。まず、各頂点 $V_k$ の移動方向を調べるために、前述した数25のベクトルの方向を調べる(ステップ290)。前記ベクトルの方向が内向きであるときは(ステップ300)拘束条件により頂点を固定し、1をカウントアップする(ステップ310)。

【0160】オブジェクトを構成するすべての頂点について、前述した処理が終わって固定されるべき頂点が決定されると、前記全頂点が固定されているかどうか判定する(ステップ240)。固定された頂点数がオブジェクトの全頂点数と等しければ変形を終了する(ステップ320)。

【0161】拘束条件を設定してニュートン法により各頂点の移動量を求める処理(ステップ250)では、固定すべき頂点の拘束条件に基づき、ニュートン法により頂点の移動量を求める。具体的には図16に示す式を解き、 $\Delta p_i$ の値を求める。

【0162】各頂点の移動を行う処理(ループ270)では、iが全頂点のx、y、zの総数に達するまで以下の処理を行う。

【0163】まず、 $|\Delta p_i|$ の値が十分小さいかどうか判断し(ステップ330)、十分小さいときは、jをカウントアップする(ステップ350)。次に、 $p_i$ を $p_i + \Delta p_i$ に更新する(ステップ360)。

【0164】なお、本発明は、上記の実施例で説明したものに限らず、種々の変形実施が可能である。

【0165】オブジェクトの変形モデルに適用する表面張力と圧力については、前記実施の形態のように、変形に伴うオブジェクトの表面積及び体積の値の変化にかかわらずに、表面張力 $\sigma$ と圧力 $p$ を一定に保つモデルでもよいし、何れか一方、もしくは両方が変化するモデルでもよい。

【0166】また、指定するパラメータは、オブジェクト全体に対して一様な値を指定することもできるし、各部分毎に異なった値を指定することもできる。また、圧力 $p$ ／表面張力 $\sigma$ の値が同じであれば(表面張力 $\neq 0$ )、結果は等しいので、比の値でもよいし、何れか一方の値を固定して他方の値を指定するようにしてもよい。

【0167】また、拘束条件の設定方法についても、オブジェクト全体に対して一様な条件を指定することもで

きるし、各部分毎に異なった条件を指定することもできる。さらに拘束条件の設定内容についても、本実施の形態で説明したものに限られない。

【0168】また、前述した変形演算例では、ポリゴンより構成されるオブジェクトを例に取り説明したが、ポリゴンオブジェクト以外でも可能である。例えばポリゴンの代わりに自由曲面を使うことで、曲面で構成されたオブジェクトに適用することも可能である。

【0169】本発明の手法は、本発明の3次元形状変形方法を実現するプログラムを開発用ハードウェアの情報記憶媒体に記憶させ、モデリングツールとして用いてもよいし、画像合成装置のハードウェアの情報記憶媒体に、拘束条件、形状データ等のデータと共に記憶させ、リアルタイムの画像合成に用いてもよい。

【0170】また画像合成に本発明の3次元形状変形方法を適用する際の演算処理は、専用の処理デバイスを用いて処理してもよいし、汎用のマイクロコンピュータ、DSP等を利用してソフトウェア的に処理してもよい。

【0171】さらに前記プログラムのプログラムコードをCD、フロッピーディスク等の記憶媒体に記憶されることにより、所与のコンピュータシステムで容易に本発明の3次元形状変形方法を実施することが出来る。

【0172】また、本発明の手法により変形した3次元形状の情報又は前記3次元形状に基づき生成された画像情報を、画像合成装置の情報記憶媒体、又は映画、ビデオ、写真等のフィルム、ビデオテープ、ビデオディスク、CD、フロッピーディスク等の記憶媒体に記憶させ、所与の画像生成装置で容易に本発明の3次元形状変形方法に基づき生成された画像を生成することが出来る。

【0173】さらに、以上説明した本発明は家庭用、業務用を問わずあらゆるハードウェアを用いて実施可能である。図18は現在広く用いられているタイプの画像合成装置のハードウェア構成の一例を示す図である。同図に示す画像合成装置はCPU1000、ROM1002、RAM1004、情報記憶媒体1006、音声合成IC1008、画像合成IC1010、I/Oポート1012、1014がシステムバス1016により相互にデータ送受信可能に接続されている。そして前記画像合成IC1010にはディスプレイ1018が接続され、前記音声合成IC1008にはスピーカ1020が接続され、I/Oポート1012にはコントロール装置1022が接続され、I/Oポート1014には通信装置1024が接続されている。

【0174】前記情報記憶媒体1006は、CD-ROM、ゲームROM、メモリカード等の画像合成装置本体と着脱可能に設けられる記憶手段を意味し、画像合成内容に応じた所定の情報を書き込み保存することのできるタイプも用いられる。また、前記ROM1002は、画像合成装置本体に固定して設けられる記憶手段である。

【0175】前記コントロール装置1022は、操作者が画像合成装置本体に入力するための装置である。

【0176】そして、前記情報記憶媒体1006やROM1002に格納される各種プログラムやシステムプログラム又は前記コントロール装置1022によって入力される信号等に従って、前記CPU1000は画像合成装置全体の制御や各種データ処理を行う。前記RAM1004はこのCPU1000の作業領域として用いられる記憶手段であり、前記情報記憶媒体1006や前記ROM1002の所定の内容、あるいはCPU1000の演算結果等が格納される。

【0177】さらに、この種の画像合成装置には音声合成IC1008と画像合成IC1010とが設けられていて音声や画像の好適な出力が行えるようになっている。前記音声合成IC1008は情報記憶媒体1006やROM1002に記憶される情報に基づいて効果音や音楽等を合成する回路であり、合成された音楽等はスピーカ1020によって出力される。また、前記画像合成IC1010はRAM1004、ROM1002、情報記憶媒体1006等から送られる画像情報に基づいてディスプレイ1018に出力するための画素情報を合成する回路である。

【0178】また、前記通信装置1024は画像合成装置内部で利用される各種の情報を外部とやりとりするものであり、通信回線を介してプログラム等の情報を送受することも利用される。

【0179】以上説明した一般的な画像合成装置を用いても本発明の3次元形状変形方法を容易に実施可能である。例えば、本発明の3次元形状変形方法を実現するプログラムを予め記憶媒体1006等記憶させておくことで、CPU1000が前記プログラムをRAM1004等を用いて実行することにより、3次元形状の変形を行う手段として機能するよう構成することが出来る。

【0180】また、変形後の3次元形状の画像を生成する手段は、画像合成IC1010によって、あるいはCPU1000と所定のソフトウェアによって実現される。

【0181】また、本発明の3次元形状変形方法により生成された画像情報等（本発明の手法により変形した3次元形状の情報又は前記3次元形状に基づき生成された画像情報）を、前記一般的な画像合成装置の記憶媒体1006に、予め画像合成用データとして記憶させておくことで、画像合成時に当該画像合成用データを用いて画像合成をおこなうよう構成することも出来る。

【0182】さらに本発明の手法は、画像合成以外にも様々な3次元形状を変形する際に用いることが出来る。例えば樹脂を使って実際に立体形状を作る場合等である。

【0183】

【図面の簡単な説明】

【図1】図1 (A)～(C)は、オブジェクトの変形を表した図である。

【図2】メタボールの濃度分布による定義の説明図である。

【図3】メタボールによる変形の説明図である。

【図4】図4 (A)～(H)は、メタボールによる変形の説明図である。

【図5】図5 (A)～(C)は、オブジェクトの変形を表した図である。

【図6】図6 (A) (B)は、オブジェクトの変形を表した図である。

【図7】図7 (A) (B)は、表面張力を説明するための図である。

【図8】図8 (A) (B)は、作用させる圧力、表面張力と圧力及びその関係を説明するための図である。

【図9】図9 (A)～(E)は、オブジェクトの変形と拘束条件の関係を説明するための図である。

【図10】図10 (A) (B)は、オブジェクトの変形と拘束条件の関係を説明するための図である。

10

【図11】本発明の手法をもじいてモデリングを行うときの手順を示したフローチャート図である。

【図12】本発明の手法の第一の変形演算のアルゴリズムを表したPAD図である。

【図13】図13 (A) (B)は、頂点に作用する表面張力の合力の演算を説明するための図である。

【図14】一次外挿の原理を説明するための図である。

【図15】表面エネルギーモデルを説明するための図である。

【図16】頂点を固定してニュートン法による演算を行うときの式の説明図である。

【図17】本発明の手法の第二の変形演算のアルゴリズムを表したPAD図である。

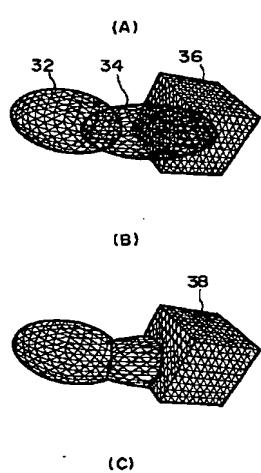
【図18】ゲーム装置のハードウェア構成の一例を示す図である。

【符号の説明】

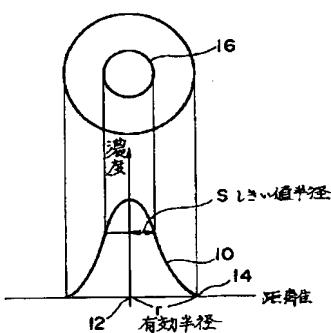
p 圧力

$\sigma$  表面張力

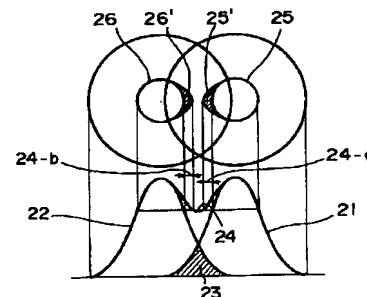
【図1】



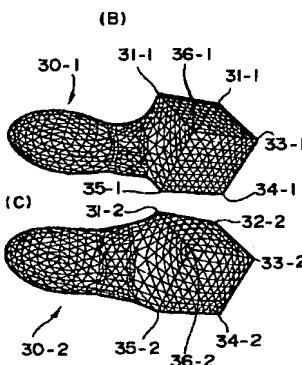
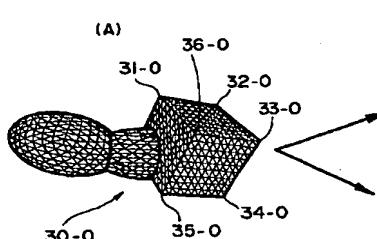
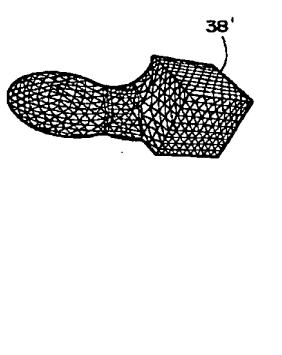
【図2】



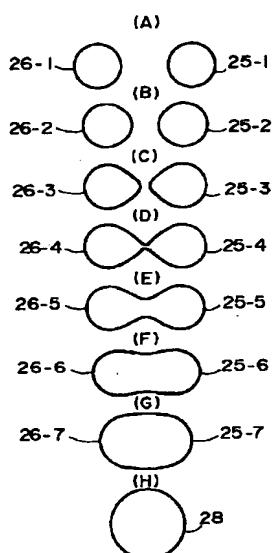
【図3】



【図5】

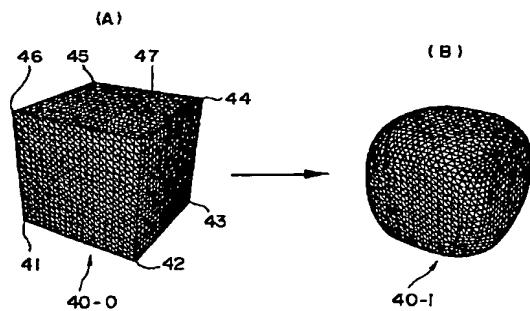


【図4】

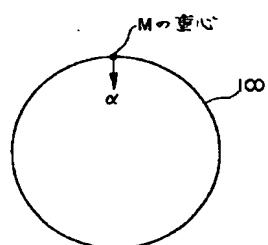
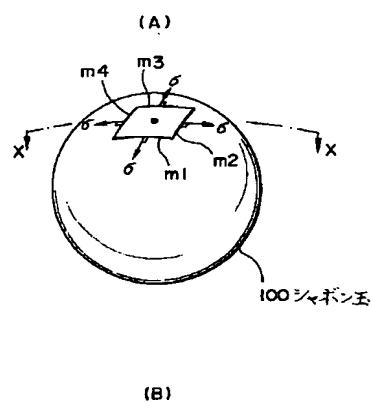
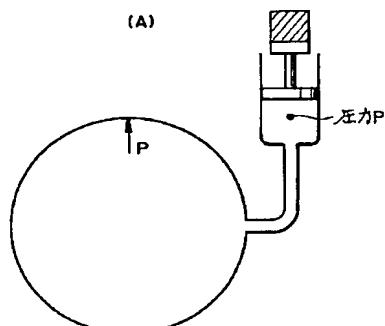


【図7】

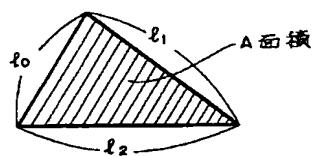
【図6】



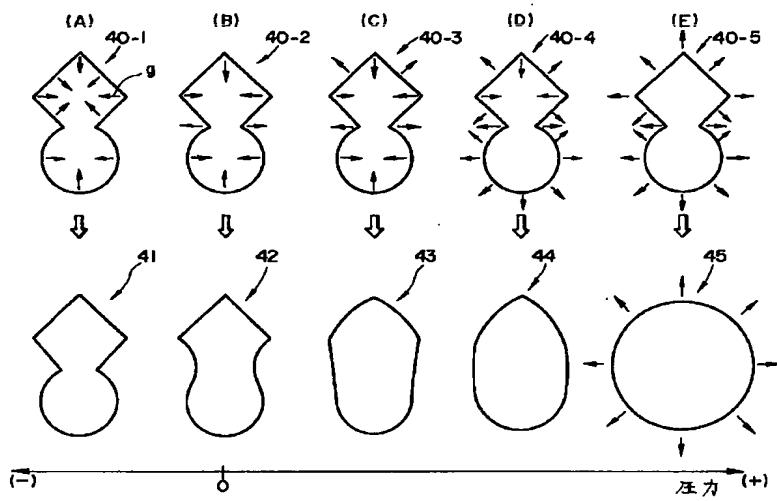
【図8】



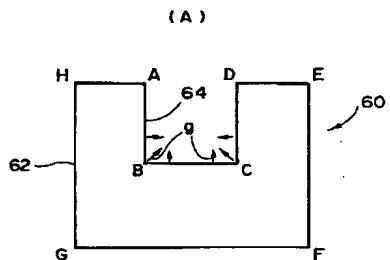
【図15】



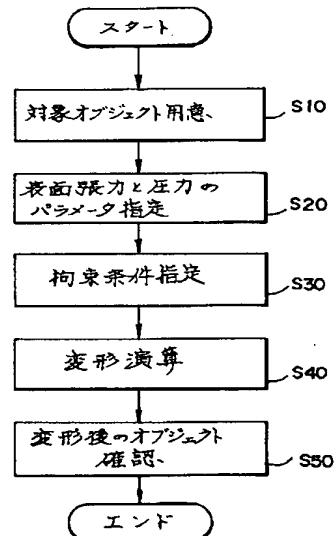
【図9】



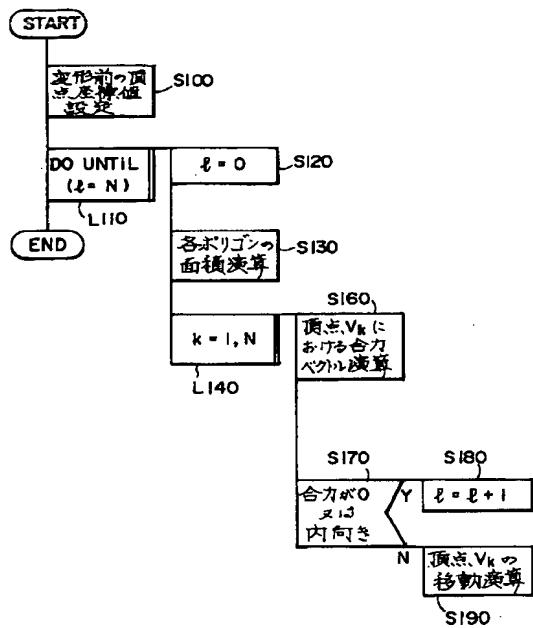
【図10】



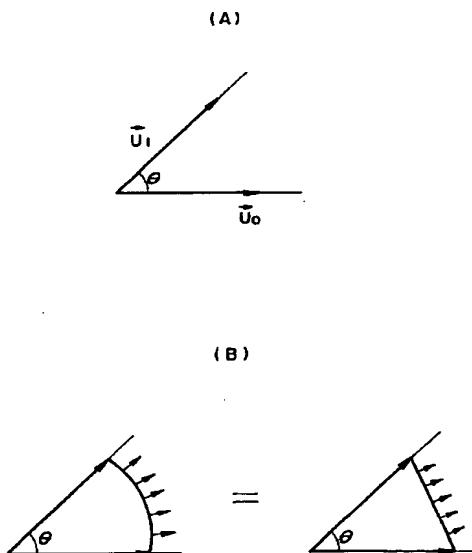
【図11】



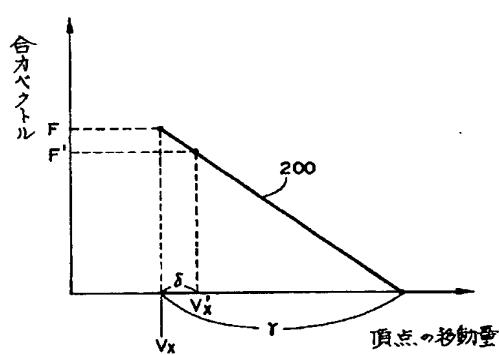
【図12】



【図13】



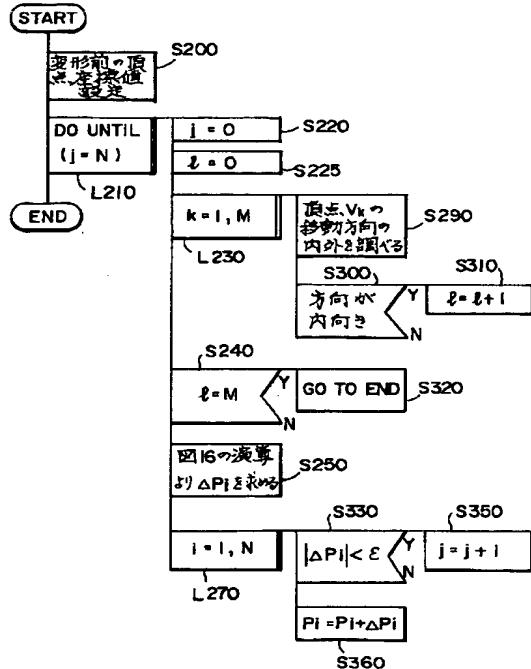
【図14】



【図16】

$$\begin{pmatrix}
 x & y & z \\
 \hline
 0 & 1 & 0 \\
 0 & 0 & 1 \\
 0 & 0 & 0 \\
 \hline
 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 \\
 \hline
 0 & 0 & 0
 \end{pmatrix}
 \begin{pmatrix}
 \Delta P_i \\
 \vdots \\
 1
 \end{pmatrix}
 = - \begin{pmatrix}
 \vdots \\
 0 \\
 \vdots \\
 0
 \end{pmatrix}$$

【図17】



[図18]

